

ENDBEARBEITUNG VON THERMOPLASTISCHEN, KOHLENSTOFFFASERVERSTÄRKTEN BAUTEILEN DURCH EINE KOMBINIERTE LASER- UND FRÄSBEARBEITUNG

G. Braun

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland.

R. Glück

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland.

M. Beyrle

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

F. Fischer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

M. Schönheits

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

F. Krebs

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Bauweisen- und Strukturtechnologie, Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg, Deutschland

Zusammenfassung

Der steigende Anteil an CFK-Komponenten in Flugzeugen erfordert von den Herstellern eine Erhöhung der Ausbringung bei gleichzeitig steigenden und strikt einzuhaltenden Qualitätsanforderungen unter wachsendem Preisdruck.

Mit zunehmender Ausbringungsmenge ist es ab einer bestimmten Stückzahl sinnvoll, den Produktionsprozess zu automatisieren, um die Kosten pro Stück marktgerecht zu senken.

Am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) in Augsburg wurde im Rahmen des FlexiCut-Projektes in Zusammenarbeit mit verschiedenen Projektpartnern eine Bearbeitungszelle für die kombinierte Laser- und Fräsbearbeitung von Bauteilen für die Endbearbeitung konzipiert, aufgebaut und an CFK-Bauteilen mit Duroplast-Matrix getestet. Im nächsten Schritt wurde nun diese Bearbeitungszelle in Verbindung mit der Bearbeitung von thermoplastischen Bauteilen erprobt. Die Durchführung der Bearbeitungsversuche sowie die Ergebnisse der Versuchsdurchführung werden nachfolgend beschrieben.

Keywords

CFK; Nachbearbeitung; roboterbasierte Bearbeitung; Laserbearbeitung; Fräsbearbeitung;

1. EINLEITUNG

Durch die erhöhten Anforderungen hinsichtlich Qualität und Stückzahl bei gleichzeitig steigendem Preisdruck in Bezug auf kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffbauteile ist eine automatisierte Endbearbeitung von Bauteilen ab einer betriebsspezifisch zu berechnenden Stückzahl wirtschaftlich sinnvoll.

Dies gilt auch im Bereich der Flugzeugproduktion, in welchem bedingt durch die steigende Zahl der Fluggäste sowie durch Überlegungen zum Umweltschutz eine steigende Nachfrage zu erwarten ist. Dies ist der Fall da alte Flugzeuge mit hohem Schadstoffausstoß durch neuere schadstoffarme Flugzeuge ersetzt werden sollen. Im Bereich der Automobilherstellung, wo bereits heute eine extrem hohe Ausbringung gefordert ist, werden

zukünftig vermehrt kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffteile zum Einsatz kommen. Dies ermöglicht erhebliche Gewichtsersparnisse am Fahrzeug. Diese Gewichtsreduktion kann dann zu geringerem Schadstoffausstoß führen.

Am ZLP Süd in Augsburg wurde im Rahmen des FlexiCut-Projektes [1] eine Fertigungszelle für die kombinierte Laser- und Fräsbearbeitung entwickelt, aufgebaut und durch die Bearbeitung von duroplastischen CFK-Bauteilen getestet. Im nächsten Schritt wurden innerhalb dieser Zelle thermoplastische Bauteile bearbeitet und nachfolgend die Bearbeitungsergebnisse ausgewertet.

2. BEARBEITUNGSVERSUCHE UND HERAUSFORDERUNGEN

2.1. Ziele, Rahmenbedingungen und Bearbeitungsprozesskette

Die kombinierte Bearbeitung wird zum Zwecke der Kostenersparnis angewendet. Es findet zunächst eine „Grobbearbeitung“ mittels Laser statt. Diese Laserbearbeitung trennt einen großen Teil des breiten Bauteilbereiches zwischen MEOP (Manufacturing Edge of Part) und EEOP (Engineering Edge of Part) ab und macht ein zeitaufwändiges Abfräsen dieses Bereichs mit hohem Werkzeugverschleiß überflüssig. Die nachfolgende Fräsbearbeitung ermöglicht es im Sinne einer Feinbearbeitung, die gewünschte Bauteilgeometrie in kurzer Zeit herzustellen. Dies ist möglich, da nur noch die durch die Laserbearbeitung geschädigten Bereiche durch Fräsbearbeitung entfernt werden müssen. Hierdurch kann die Prozesszeit des gesamten Bearbeitungsvorganges, der Werkzeugverschleiß und somit die entstehenden Kosten des gesamten Bearbeitungsvorgangs gesenkt werden.

Ziel der Bearbeitungsversuche der beiden auf BILD 3 dargestellten thermoplastischen Einzelteile war der Test der zunächst an duroplastischen Bauteilen erprobten, kombinierten Bearbeitung an kohlenstoffaserverstärkten Bauteilen mit thermoplastischer Matrix.

Für die kombinierte Bearbeitung stand die nachfolgend auf BILD 1 und BILD 2 dargestellte Fertigungszelle zur Verfügung.

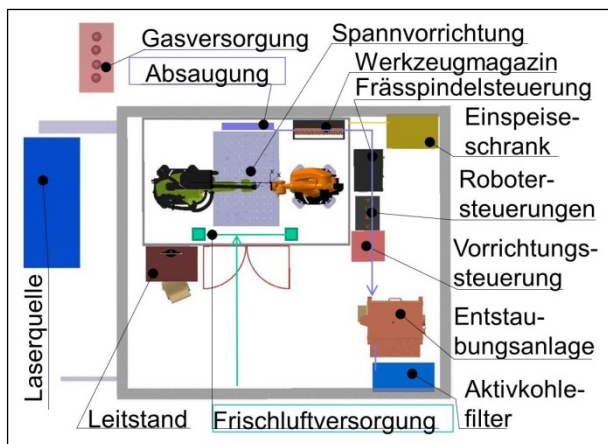


BILD 1 : Layout der Fertigungszelle.

BILD 1 zeigt ein vereinfachtes allgemeines Layout der Zelle. Eine detailliertere Darstellung der Zelle in Bezug auf

die Bearbeitung von duroplastischen CFK-Bauteilen findet man in [1] und [2].

BILD 2 illustriert die Situation bei der Bearbeitung der thermoplastischen CFK-Bauteile inklusive der neu entwickelten Vorrichtung zur Aufspannung der thermoplastischen Bauteile zwischen den Robotern.

Die auf BILD 3 dargestellten Bauteile mussten beide entlang des gesamten Umfangs laser- und fräsbearbeitet werden. Die CFK-Bauteile wurden unter Verwendung des Matrixmaterials Polyetherimid (PEI) durch Umformen von Organoblechen mittels Heißpressverfahren hergestellt.

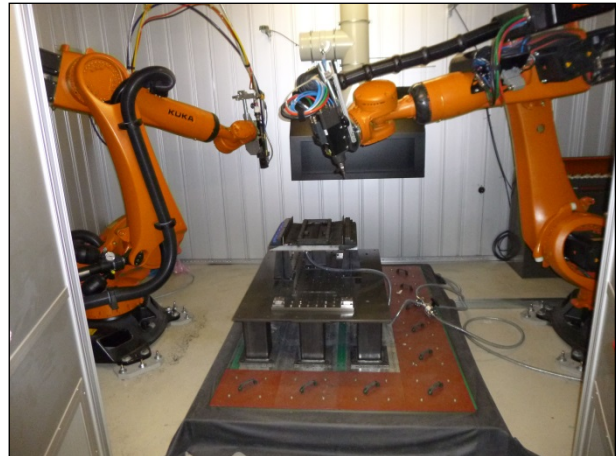


BILD 2 : Foto des Zellinnenraums.



BILD 3 : Darstellung der bearbeiteten Bauteile.

Dieses Material zeichnet sich unter anderem durch einen niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine gute und wirtschaftliche Bearbeitbarkeit aus [3]. Diese Bauteile sind Bestandteile einer Baugruppe namens „Wellholm“, welche zur Aufnahme von starken Druck- und Biegekräften als Crashelement eingesetzt werden kann. Diese Baugruppe ist auf BILD 4 dargestellt.



BILD 4 : Baugruppe „Wellholm“ in Anlehnung an [4] .

Die Bearbeitung der Bauteile erfolgte - wie bei der Endbearbeitung der duroplastischen Bauteile - entlang der auf BILD 5 dargestellten Prozesskette. Dabei handelte es sich ausschließlich um eine umlaufende Konturbearbeitung der dargestellten Bauteile (siehe BILD 3).

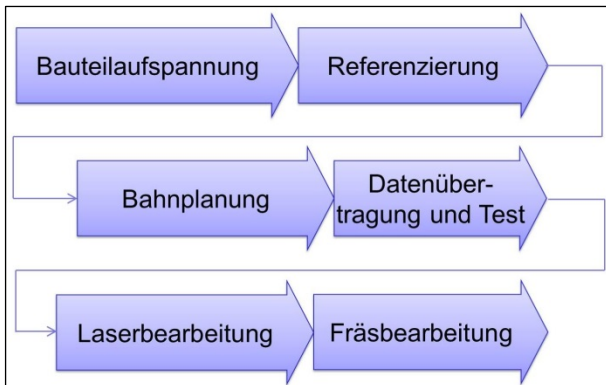


BILD 5 : Bearbeitungsprozesskette aus [2].

2.2. Bestimmung der technologischen Größen

Bevor die oben dargestellte Bearbeitungsprozesskette fachgerecht durchlaufen werden kann, ist es notwendig, die technologischen Größen für die Laserbearbeitung und Fräsbearbeitung, für den zu bearbeitenden Werkstoff, zu bestimmen.

Die hierfür verwendete Vorrichtung sowie das dafür verwendete ebene Bauteil ist auf BILD 6 dargestellt.

Die wichtigsten technologischen Kenngrößen zur Laserbearbeitung, die hier ermittelt wurden, sind die Lage des Fokuspunktes des Lasers bezogen auf die Bauteiloberfläche sowie die tangentielle Bewegungsgeschwindigkeit des Fokuspunktes bezüglich der Oberfläche. Es wurden beide Größen variiert und lediglich die Wertepaare weiterverarbeitet, bei denen eine Trennung des Materials erfolgt ist. Die Ermittlung dieser Größen geschah hier dadurch, dass Streifen aus der auf BILD 6 dargestellten ebenen CFK-Platte herausgeschnitten wurden. Dabei wurde auch die Breite der Wärmeeinflusszone (WEZ) erfasst.

Die ermittelten Werte sind dabei abhängig von dem Aufbau des CFK-Verbundwerkstoffes, der Wärmeleitung

des Thermoplastbauteiles sowie von der Bauteilgeometrie und von der Stärke des Bauteils. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es das Ziel, jenes Wertepaar experimentell zu ermitteln, bei dem bei maximaler Bewegungsgeschwindigkeit des Fokuspunktes das Bauteil sicher getrennt wird. Diese Geschwindigkeit nennt man auch Trenngrenze.

Zur Ermittlung der Trenngrenze ist neben den Gegebenheiten am Werkstück ebenfalls noch der Typ der Laserquelle sowie der verwendete Endeffektor wichtig [1]. Für unsere Versuche wurde eine handelsübliche 2KW-Laserquelle der Firma Trumpf mit der Bezeichnung TruDisk 2001 (4c) verwendet, welche einen Laserstrahl mit einer Wellenlänge von circa $\lambda \approx 1\mu\text{m}$ bereitstellt. Laserstrahlung mit einer solchen Wellenlänge lässt sich sehr leicht durch Lichtleitfasern zum Endeffektor am Roboter leiten und mittels einer geeigneten Optik fokussieren. Dies resultiert daraus, dass die Laserstrahlung dieser Wellenlänge von einigen industriellen Standardgläsern wie z. B. Bor-Kronglas nicht absorbiert wird [5]. Der hier verwendete Endeffektor vom Typ BEO D D70 der Fa. Trumpf fokussierte den Laserstrahl am Roboter mittels einer entsprechenden Optik.

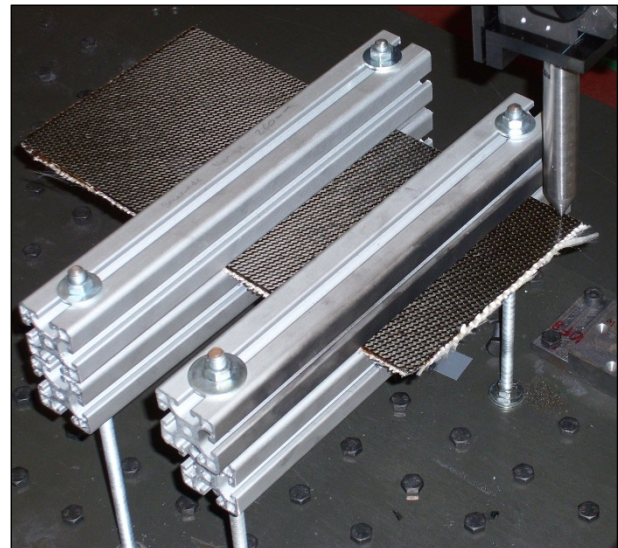


BILD 6 : Vorrichtung zur Prozessgrößenermittlung.

Abschließend wurden folgende technologische Startwerte für die Laserbearbeitung ausgewählt.

Laserparameter

Fokuslage: Fokuspunkt 1 Millimeter unter der Bauteiloberfläche.

Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 1,5 \text{ m/min}$

Das Schnittergebnis mit den o. g. Laserparametern ist auf BILD 7 dargestellt.

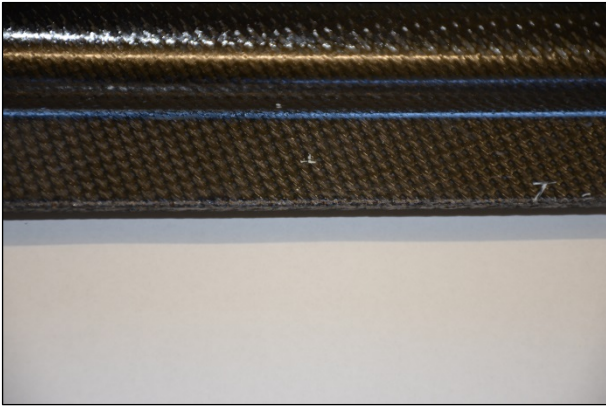


BILD 7 : Laserschnitt eines ebenen Bauteils.

Bei der Konturbearbeitung durch Fräsen handelte es sich um eine Bearbeitung durch Umfangsfräsen. Auch hier wurde das Gegenlaufräsen gewählt (siehe BILD 8) aufgrund der Tatsache dass die Temperatur- und Kräfteinwirkung auf die spätere Schnittkante hierbei minimal ist [6]. Der Arbeitseingriff a_e wurde dabei so gewählt, dass er die gesamte Wärmeeinflusszone (WEZ) der vorangegangenen Laserbearbeitung sicher abräst wird, aber dennoch der Arbeitseingriff a_e nicht unnötig breit ausfällt.

Die Breite der Wärmeeinflusszone wurde hierbei durch die Variation des Arbeitseingriffes a_e bei der Fräsbearbeitung der Laserschnittkanten und einer nachfolgenden visuellen Kontrolle der noch vorhandenen sichtbaren Schädigung abgeschätzt.

Nach einer sinnvollen Auswahl des Arbeitseingriffes wurden die Werte für die Schnittgeschwindigkeit v_c und die Vorschubgeschwindigkeit v_f ermittelt. Als wichtige Kriterien sind hier die Prozesszeit, der Werkzeugverschleiß und damit auch die Wirtschaftlichkeit und die Rauigkeit der entstehenden Schnittkante zu nennen sowie das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems Werkzeug, Werkstück und Vorrichtung.

Die Ermittlung der o. g. Fräsparemeter erfolgte hier analog zu der Ermittlung der Laserparameter durch Einspannung einer ebenen CFK-Platte und der mehrmaligen Bearbeitung einer kurzen Bauteilkante bei gleichzeitiger Variation der o. g. Parameter. Weiterhin ist es sinnvoll, die freie schwingungsfähige Länge des Bauteils bis zur Einspannung so groß zu wählen wie die maximale schwingungsfähige Länge bei der späteren Fräsbearbeitung am Zielbauteil.

Bei den Bearbeitungsversuchen wurde sowohl die 8 kW Frässteuerung als auch der Fräseneffektor ES 350L von der Fa. MAPAL zur Verfügung gestellt.

Letztendlich wurden die nachfolgend aufgeführten Fräsparemeter ausgewählt, welche auf BILD 8 bildlich dargestellt sind.

Fräsparemeter

Vorschubgeschwindigkeit v_f =	2,5 m/min
Schnittgeschwindigkeit v_c =	251 m/min
Arbeitseingriff a_e =	3 mm

Auch diese ermittelten Werte sind Ausgangswerte, welche gegebenenfalls an das Zielbauteil angepasst werden müssen.

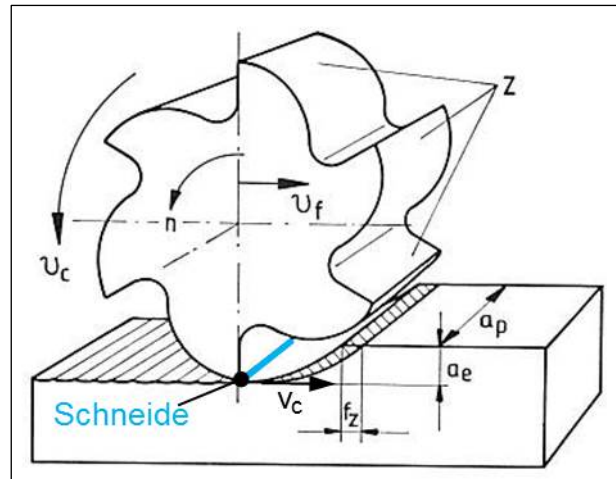


BILD 8 : Umfangs-Gegenlaufräsen in Anlehnung an [7].

2.3. Bauteilauflösung

Ziel der Bearbeitung war es, die auf BILD 3 dargestellten Bauteile in einem Bearbeitungsvorgang entlang der Engineering Edge of Part (EEOP) zu bearbeiten.

Die Außenkontur bei der Laserbearbeitung liegt hierbei um den Offset der Breite der Wärmeeinflusszone sowie der anteiligen Schnittspaltbreite nach außen versetzt neben der eigentlichen Sollkontur, welche erst durch die darauffolgende Fräsbearbeitung hergestellt wird. Die für die Bearbeitung verwendete Vorrichtung ist auf BILD 9 zu sehen.

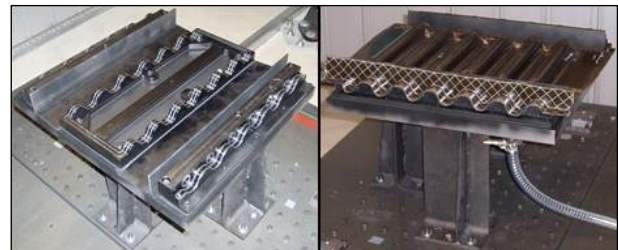


BILD 9 : Spannvorrichtung links ohne und rechts mit Bauteilen.

Die Vorrichtung ist, bedingt durch geplante Umfangsbearbeitung aller Bauteile in einem Arbeitsgang, als Vakuumvorrichtung ausgelegt wie auf BILD 9 (links) an dem Vakuumschlauch erkennbar ist. Die Bauteilaufnahmen auf BILD 10 sind entsprechend den CAD-Daten der Bauteile konturfräst. Zusätzlich sind in sich geschlossene Nuten entlang des Umfangs gefräst, in welchen Gummidichtungen eingebracht sind. Das Bauteil wurde auf die entsprechende Bauteilaufnahme aufgelegt, von Hand angedrückt und gleichzeitig der eingeschlossene Raum unterhalb des Bauteils, der durch die oben erwähnten Dichtungen abgedichtet wurde, mittels Membranpumpe evakuiert. Die Kraftwirkung auf die Bauteile resultierte aus dem Druckunterschied zwischen dem Umgebungsdruck und dem Druck innerhalb des evakuierten Volumens sowie der Bauteilfläche auf welche die Druckdifferenz wirkte.

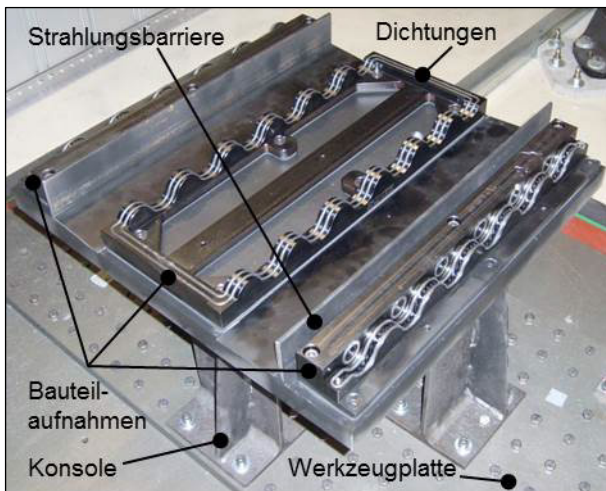


BILD 10 : Wichtige Bestandteile der Vorrichtung.

Die Krafteinleitung des Werkstücks in die Vorrichtung erfolgte durch eine Kombination von Kraftschluss und Formschluss. Welche der beiden Prinzipien vorwiegend zum Tragen kommt, ist von der Richtung der eingeleiteten Kräfte abhängig.

Für die Vorrichtung konnte anhand von speziellen Markern ein Vorrichtungskoordinatensystem eingemessen werden. Dadurch konnte mit beiden Robotern ein gemeinsames Vorrichtungskoordinatensystem bestimmt werden, welches es den Robotern ermöglichte, ihre jeweiligen Bahnen in Bezug auf ein gemeinsames Koordinatensystem abzufahren. Diese Marker weisen auch Merkmale auf, die es später ermöglichten, die Bauteile bezüglich des Vorrichtungskoordinatensystems einzumessen.

Die Oberfläche der Vorrichtung wurde so gewählt, dass bei der späteren Laserbearbeitung keine starke Reflexion des Laserstrahls zurück in die Laseroptik des Endeffektors erfolgen kann. Durch das Anbringen von Strahlungsbarrieren in Form von Winkeln wurde sichergestellt, dass bei der Laserbearbeitung der Winkel keine Laserstrahlung auf die Oberfläche des Steges auftrifft, der mittig auf der Vorrichtung gespannt ist.

Durch den Aufbau der Werkzeugplatte lassen sich die darauf montierte Baugruppe und damit auch die darauf befestigten Bauteile und die zugehörigen Bearbeitungsbahnen so verschieben, dass der Roboter kollisionsfreie, gut zugängliche und möglichst optimale Bahnen im Sinne der Bearbeitungsanforderungen abfahren kann.

2.4. Referenzierung und Bahnplanung

Um eine möglichst genaue Bearbeitung zu ermöglichen, ist es sinnvoll, vorhandene Ungenauigkeiten, sofern möglich, zu minimieren.

Hier wurde die Bahnplanung und somit die Programmerstellung mittels eines Systems zur Offline-Programmierung von Robotern mit dem Namen DELMIA durchgeführt. Die modellbasierte, geometrische Basis für diese Bahnplanung sind CAD-Modelle. Diese CAD-Modelle spiegeln im Normalfall nicht die exakte geometrische Realität der Bearbeitungszelle wieder. Dies ist unter anderem deshalb der Fall, da nicht alle Objekte in dieser Fertigungszelle hochgenau eingemessen werden können. Darunter fallen beispielsweise Schläuche und Elektroleitungen die nicht modelliert werden.

Dieses gilt unter anderem auch für die Vorrichtung, welche das Bauteil in einer definierten Position und Orientierung aufnehmen, spannen und die Kräfte ableiten soll. Im Regelfall sind nicht alle Maßabweichungen nach Betrag und Richtung bekannt, so dass es sinnvoll sein kann, das Bauteil auf der Vorrichtung einzumessen.

Wie bereits in Kapitel 2.3 beschrieben wird das Vorrichtungskoordinatensystem unter Verwendung bestimmter Marker definiert und mittels Messvorgängen durch die Roboter für die Roboter eingemessen.

Diese Marker wurden hier ebenfalls dazu verwendet, die Ist-Position von sinnvoll gewählten Punkten bezüglich des Vorrichtungskoordinatensystems zu ermitteln. Diese Punkte sind in Abhängigkeit von der Markergeometrie und der Geometrie des gemessenen Bauteils auszuwählen.

Die so ermittelten Messwerte der Position der Bezugspunkte wurden dann in das CAD-Modell importiert und das Bauteil durch bestmöglichen Fit der Messpunkte mit der CAD-Geometrie von Bauteil und Markern in seiner Position und Orientierung bestmöglich den realen Gegebenheiten angepasst.

Somit wurde eine der vorhandenen Ungenauigkeiten im Vorfeld minimiert und dadurch auch die Gesamtungenauigkeit bei sonst gleichen Verhältnissen verkleinert.

Mit diesem korrigiertem CAD-Modell wurde dann die Bahnplanung für die Laser- und Fräsbearbeitung vorgenommen. Bei der Bahnplanung ist zu beachten, dass die Parameter für die Bahnplanung entsprechend der gewünschten Bearbeitungsgenauigkeit zu wählen sind.

2.5. Datenübertragung und Test

Anschließend wurden die Programme auf die Robotersteuerungen übertragen. Nach dem Austausch einiger Planungsdaten (beispielsweise Koordinatensysteme) mit den real in der Fertigungszelle bestimmten Daten wurden die Programme getestet.

Bei diesen Tests wurde geprüft, ob bei der Bewegung des TCPs (Tool Center Point) mit Endeffektor mit verminderter Geschwindigkeit auf den errechneten Bahnen Kollisionen auftreten, die Robotersteuerung Bahnen berechnet, welche zu unzulässigen Bewegungen führen oder andere Auffälligkeiten auftreten.

Diese Tests sind notwendig, da aus Kostengründen vereinfachte Endeffektoren (beispielsweise ohne flexible Kabel und flexible Schläuche) modelliert wurden oder Position und Orientierung der Störkonturen im CAD-Modell oftmals ungenau modelliert sind (beispielsweise bedingt durch nicht zu vermeidende Toleranzen beim Aufbau der Zelle). Weiterhin berechnet die Robotersteuerung während der Programmlaufzeit Bereiche der Bewegungsbahnen des Endeffektors welche geringfügig von der geplanten Bewegungsbahn abweichen können.

2.6. Laserbearbeitung

Die Laserbearbeitung hat die Aufgabe, große Teile des überschüssigen Randmaterials zu entfernen. Diese Bearbeitung dient dazu, bei möglichst minimaler

Wärmeeinflusszone eine nachfolgende Feinbearbeitung mittels Gegenlaufräsen mit maximal sinnvoller Vorschubgeschwindigkeit v_f und Schnittgeschwindigkeit v_c sowie geringer Arbeitseingriff a_e und geringem Werkzeugverschleiß zu ermöglichen (siehe BILD 8).

Für die Laserbearbeitung der Bauteile wurde das schon in Kap. 2.2 aufgeführte Laserequipment der Fa. Trumpf verwendet.

Zum besseren Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge der durchgeführten Laserbearbeitung sind die wichtigsten Kenngrößen im Zusammenhang mit der hier durchgeführten Laserbearbeitung nachstehend in Anlehnung an [8] und [9] zusammengestellt. Anhand dieser wird auf die durchgeführte Laserbearbeitung eingegangen.

- Anlagenparameter

- Leistung,
- Wellenlänge in Abhängigkeit vom Art und Aufbau der Laserquelle,
- Bearbeitungsoptik mit den wichtigen Kenngrößen Brennweite und Fokusslage,
- Prozessgas insbesondere Eigenschaften, Druck.

- Prozessparameter

- Betriebsart des Lasers beispielsweise cw- (continuous wave → Dauerstrich) Betrieb oder gepulster Betrieb,
- Überfahrstrategie,
- Bahnführung und damit verbunden die Bauteilgenauigkeit,
- Einstrahlwinkel beispielsweise stechend oder schleppend,
- Vorschub(-geschwindigkeit).

- Bauteil- und Werkstoffparameter

- Bauteilabmessungen,
- Oberflächenbeschaffenheit,
- Thermische Eigenschaften,
- Faserausrichtung, Fasermaterial,
- Matrixwerkstoff, Schlichte, Binder, Faservolumengehalt.

Die **Anlagenparameter** legen die grundsätzlichen Bearbeitungsparameter fest. Die Laserstrahlquelle TRUMPF TruDisk 2001 stellt eine **Leistung** von 2kW zur Verfügung. Setzt man diese Laserquelle für das Laserstrahltrennen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen ein, so ist in unserem Fall die Bauteilstärke, eine wirtschaftlich sinnvolle Bearbeitung vorausgesetzt, auf ca. 3mm begrenzt.

Die **Wellenlänge** des Laserstrahls beträgt bauartbedingt $\lambda=1030\text{nm}$, also $\lambda\approx 1\mu\text{m}$. Die Absorptionswerte vieler Kunststoffe sind bei $\lambda\approx 10\mu\text{m}$ höher als bei Lasern mit $\lambda\approx 1\mu\text{m}$. Dies kann bei geringerem Faservolumengehalt zu höheren Werten für die Trenngrenze führen [10]. Allerdings ist es heute noch sehr aufwändig, hohe Laserstrahlleistungen mit einer Wellenlänge von $\lambda\approx 10\mu\text{m}$ zu einem Roboterendeffektor zu führen. Daher wurde hier auf diesen am Markt gebräuchlichen Lasertyp

zurückgegriffen.

Der Fokuspunkt, welcher zum Schneiden des Materials verwendet wird, liegt bei dem verwendeten Endeffektor 136 mm unter der Unterkante des Laserendeffektors. Auch dieser Punkt wurde individuell für den gegebenen Endeffektor bestimmt und wurde bei der Programmierung als TCP (Tool Center Point) verwendet.

Als Prozessgas kam hier Druckluft mit einem Absolutdruck von 2 bar zum Einsatz, um die vorhandene Schmelze während des Lasertrennvorgangs auszublasen.

Für die **Prozessparameter** wurden die folgenden beschriebenen Entscheidungen getroffen.

Als Betriebsart wurde der cw-Betrieb (Dauerstrichbetrieb) gewählt, da die Laserquelle schwerpunktmäßig hierfür konzipiert wurde.

Als Überfahrstrategie wurde in diesem Fall das einmalige Überfahren bei gleichzeitiger Trennung des Werkstoffes gewählt. Dies ist die schnellste Möglichkeit, den Werkstoff mittels Laser zu trennen. Allerdings entsteht hierbei eine größere Wärmeeinflusszone im Vergleich zu der Strategie der Mehrfachüberfahrten.

Bei der Strategie der Mehrfachüberfahrten wird mehrmals über die Laserbahn gefahren, wobei die Nuttiefe mit der Anzahl der Überfahrten zunimmt. Zur Minimierung der Wärmeeinflusszone müssen allerdings Pausen zwischen den Überfahrten eingelegt werden, was die Prozesszeit erhöht. Diese Zusammenhänge werden detailliert in [10] beschrieben.

Die Bahnführung erfolgte hier mittels eines Vertikal-Knickarmroboters, der links auf BILD 2 dargestellt ist. Somit ist die wichtige Bahngenauigkeit entscheidend von der Genauigkeit der Roboterbahnführung abhängig.

Der Endeffektor wurde hier so orientiert, dass er senkrecht über dem Bauteil stand, da dies günstig für die Kollisionsbetrachtungen war.

Die maximale tangentielle Vorschubgeschwindigkeit wurde im Rahmen der Bestimmung der technologischen Größen, welche in Kap. 2.2 beschrieben wurden, ermittelt.

Auf die **Bauteil- und Werkstoffparameter** soll hier nur kurz eingegangen werden. Der Steg (BILD 3) hat nach Nachbearbeitung die Abmessungen 496mm x 200mm x 26mm und die Winkelanbindung hat die Abmessungen 496mm x 20mm x 31mm. Der mittlere Radius der Wellenform des Steges und der Winkelanbindung beträgt 40 mm. Dies stellt besondere Anforderungen an die Bahngenauigkeit der Roboterbahnführung.

Die Oberfläche war wenig reflektierend, was eine senkrechte Anordnung des Endeffektors über dem Bauteil ermöglichte (siehe Kap. 2.3).

Es handelte sich hier um kohlenstofffaserverstärkte Bauteile mit PEI-Matrix. Hier wurde ein Sublimationschnitt durchgeführt, bei dem der Laserstrahl so lange auf das Verbundmaterial einwirkte, bis die Carbonfaser sublimierte. Die Matrix ist dabei bereits sehr viel früher als zu diesem Zeitpunkt geschmolzen bzw. sublimiert. Die C-Fasern leiten die Wärme um den Faktor 10 schneller als die Matrix [10], sodass sich die Wärme sehr schnell in diesen ausbreitet, was die Adhäsion zwischen Faser und Matrix beeinflusst. Dies hat Auswirkungen auf die Wärmeeinflusszone (WEZ) und somit den notwendigen Arbeitseingriff a_e . So geben die Faserausrichtung und die Wärmeleiteigenschaften im Wesentlichen vor, wie weit die Wärme in den Werkstoff vordringt und bestimmt somit maßgeblich die Breite der WEZ. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Breite der mittleren WEZ weiterhin von

dem Faservolumengehalt sowie von der Wellenlänge der Laserstrahlung in Verbindung mit den Eigenschaften des Matrixwerkstoffes abhängt [1].

Bei der Betrachtung der Wärmeeinflusszone ist weiterhin zu berücksichtigen, dass von außen nur ein Teil dieser Zone sichtbar ist. Bei dem von außen sichtbaren Bereich handelt es sich nur um den sichtbaren, thermisch geschädigten Bereich der Matrix. Dass aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit der Faser die Verbindung zwischen Faser und Matrix auch weiter innen, von außen unsichtbar, Schaden genommen haben kann, ist ebenfalls zu berücksichtigen.

Ein Beispiel für einen bearbeiteten Steg ist zur Veranschaulichung auf BILD 11 dargestellt.

Wie auf BILD 11 deutlich erkennbar, entstand beim Laserschneiden der thermoplastischen Werkstoffe ein Rand, an welchem sich das Matrixmaterial aufstellte. Hierdurch unterschied sich die Schnittkante dieses Werkstoffes auf den ersten Blick deutlich von der Schnittkante der bisher geschnittenen duroplastischen Materialien.

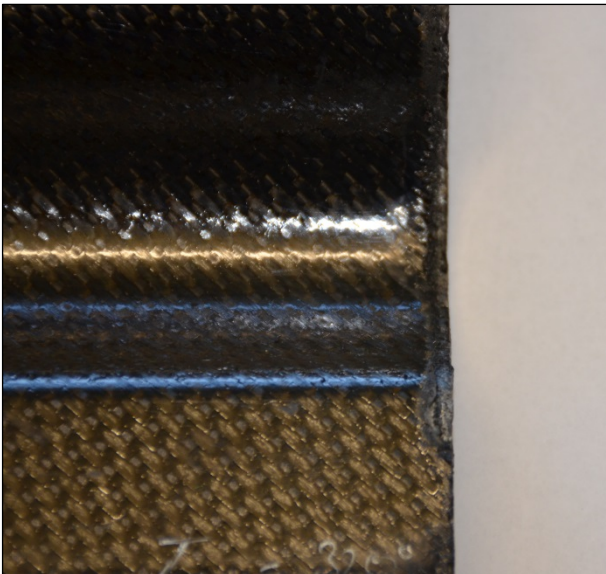


BILD 11 : Laserbearbeiteter Steg.

Die Breite der Wärmeeinflusszone entlang der geraden Kanten zeigte den erwarteten Wert und konnte leicht und mit hoher Geschwindigkeit abgefräst werden. Entlang der geschwungenen Kanten – mit dem mittleren Radius von 40mm - zeigte sich eine breitere Wärmeeinflusszone, was auf eine Abweichung des Fokuspunktes zur realen Bauteiloberfläche zurückzuführen ist. Die Gründe für die Abweichungen können z. B. die Ungenauigkeiten bei der Bahnplanung sein, die Abweichungen des Bauteiles von der Sollgeometrie, welche aus Einflussgrößen aus dem Bauteilherstellungsprozess resultieren und auch Auswirkungen auf die Bauteilauflastspannung haben, sowie die Bahnengenauigkeit, Posewiederholengenauigkeit und Posegenauigkeit des lediglich statisch belasteten Roboters [11].

Die Beträge und Richtungen der o. g. Abweichungen konnten aufgrund begrenzter Ressourcen nicht ermittelt werden. Dementsprechend wurde die aktuelle WEZ neu ermittelt und die Bahnplanung entsprechend korrigiert. Anschließend wurden der Arbeitseingriff a_e sowie die Schnittgeschwindigkeit entsprechend modifiziert.

2.7. Fräsbearbeitung

Bei der Umfangs-Gegenlaufräsbearbeitung kam ein T-Rex-Schafffräser Z2x2 der Firma Hufschmied zum Einsatz, welcher speziell für das Konturfräsen von thermoplastischen Werkstoffen entwickelt wurde.

Die Bearbeitungsergebnisse sind auf BILD 12 und BILD 13 zu sehen. Sowohl bei der Bearbeitung des Steges als auch bei der Bearbeitung der Winkelanbindung zeigten sich gute Bearbeitungsergebnisse.

Aufgrund des erhöhten Arbeitseingriffes a_e - bedingt durch die breitere Wärmeeinflusszone, bei der Bearbeitung der wellenförmigen Laserschnittkante - musste die Vorschubgeschwindigkeit auf $v_f=2\text{m/min}$ reduziert werden. Die Schnittgeschwindigkeit v_c , welche von der Drehzahl n und dem Fräserdurchmesser d abhängt, wurde bei 251m/min belassen. Die Zähnezahl z des Fräasers betrug 4 sowie der Vorschub pro Zahn jetzt $f_z=0,05\text{mm}$. Die Schnittbreite a_p entspricht, wie auch in Kap. 2.2, der Bauteildicke senkrecht zur Oberfläche (siehe BILD 8).

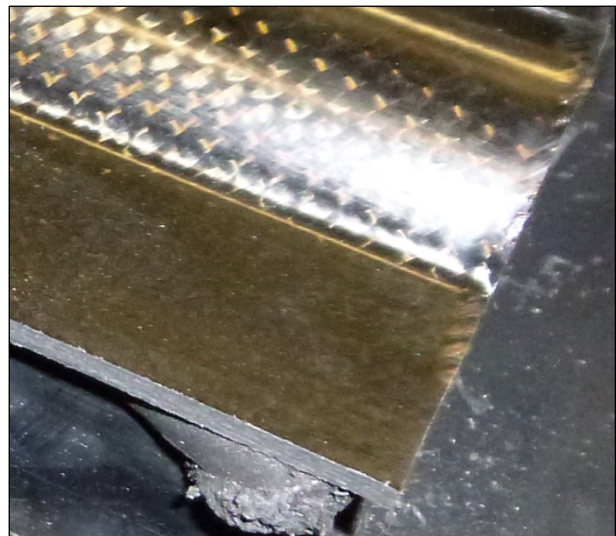


BILD 12 : Fräsbearbeiteter Steg.



BILD 13 : Fräsbearbeitete Winkelanbindung.

Diese Schnittbreite blieb über die gesamte Umfangs-Fräsbearbeitung konstant d. h. die Fräserlängsachse stand stets senkrecht zur rechnerischen Bauteiloberfläche. Dies war auch schon bei der Ermittlung der Fräsparemeter

in Kap. 2.2 der Fall. Diese Ausrichtung des Fräswerkzeugs führte zu den qualitativ hochwertigsten Bearbeitungsergebnissen. Diese sind auf BILD 13 dargestellt.

3. FAZIT

Die auf BILD 3 dargestellten Bauteile wurden von Beginn an als sogenannte „Schikanebauteile“, d. h. Bauteile mit bewusst schwierig gewählter Geometrie konzipiert. Daraus ergaben sich ein schwieriger Herstellungsprozess sowie merkliche Abweichungen zur CAD-Modellgeometrie. Dies führte bei der Aufspannung der Bauteile zu verschiedensten Herausforderungen. In Kombination mit den Roboterungenauigkeiten (s. a. Kap. 2.6) kam es bei der Laserbearbeitung der wellenförmigen Zielgeometrie tendenziell zu qualitativ ungünstigen Ergebnissen.

Bei der Bearbeitung des Realbauteils der Firma GKN im Rahmen des FlexiCut-Projektes [1], welches einen minimalen Radius von ca. 900mm aufwies, war dies bei der Bearbeitung der gekrümmten Kontur nicht der Fall.

Es ist davon auszugehen, dass bei der Bearbeitung der wellenförmigen Außenkanten dieses Werkstücks durch diesen Roboter keine ausreichende Genauigkeit für einen sauberen Laserschnitt eingehalten werden konnte. Gründe hierfür wurden in Kap. 2.6 erörtert.

Eine Möglichkeit, die roboterseitigen Ungenauigkeiten zu korrigieren, ist die Durchführung genauigkeitssteigernder Maßnahmen am Roboter für den Fall, dass diese Maßnahmen die Roboterengenauigkeit hinreichend genau steigern können und das dies wirtschaftlich sinnvoll ist. Diese Maßnahmen können allerdings die Anlagenkosten erheblich erhöhen.

Weiterhin kann man in Ausnahmefällen dahingehend reagieren, die Bearbeitung des wellenförmigen Bereiches mittels Fräsen im Vollschnitt oder durch mehrere Teilschnitte durchzuführen. Im Gegenzug erhöhen sich dann die Fräsbearbeitungszeit erheblich und ebenfalls der Werkzeugverschleiß. Gleichzeitig entfällt die Laserbearbeitungszeit. Bei einer einmaligen Bearbeitung des Bauteils auf Endkontur durch Vollschnitt ist allerdings darauf zu achten, dass der abgeschnittene Teilbereich gegen Ende der Bearbeitung abreißen kann. Dies führt zu einer entsprechenden Oberflächenstruktur in dem Abrissbereich.

Bei der Festlegung der Fräsbearbeitungsstrategie ist somit darauf zu achten, dass sich dieser Bereich nicht auf der später sichtbaren EEOP befindet, und dass der abgeschnittene Teilbereich nach dem Ablösen keinen Schaden anrichtet oder den weiteren Bearbeitungsvorgang behindert. Wenn man dies nicht sicherstellen kann, so ist es bei der reinen Fräsbearbeitung oftmals notwendig, den unerwünschten Bereich zwischen MEOP und EEOP aufwändig im Teilschnitt abzutragen. Im Vergleich hierzu verkürzt eine vorhergehende Laserbearbeitung die Nachbearbeitungsprozesszeit oftmals erheblich.

Hinsichtlich der Fräsbearbeitung kann festgestellt werden, dass die Roboterungenauigkeit hier keine erkennbaren Auswirkungen auf die Oberflächenqualität der zu bearbeiteten wellenförmigen Kontur hatte.

Es hat sich herausgestellt, dass es wichtig ist, schon im Vorfeld sicherzustellen, dass die Bauteilgeometrie


möglichst genau mit der CAD-Geometrie übereinstimmt. Bereits bei der Bauteilkonstruktion müssen die Bearbeitungsverfahren und die Maschinentechnik der Nachbearbeitung bekannt sein und berücksichtigt werden. Dies hat insbesondere die Laserbearbeitung deutlich gezeigt.

Abschließend kann gesagt werden, dass die ebenen, kohlenstofffaserverstärkten Platten mit PEI-Matrix (siehe BILD 6) sich problemlos sowohl mittels Laser als auch durch Fräswerkzeuge bearbeiten ließen.

Die oben beschriebenen Herausforderungen, welche sich aus der abweichenden Bauteilgeometrie, Fertigungsabweichungen und den Ungenauigkeiten der Maschinentechnik ergaben, sind überwiegend bauteilspezifisch verursacht.

Falls die zu bearbeitenden Bauteile bestimmte Kriterien seitens Konstruktion und Fertigung erfüllen, welche sich aus den betrieblichen und maschinentechnischen Randbedingungen und Eigenschaften ergeben, dann ist eine kostensparende und flexible Nachbearbeitung durch die beschriebene kombinierte Bearbeitung von Thermoplasten und Duroplasten möglich.

Autoren:

Georg Braun,  <https://orcid.org/0000-0002-8181-5513>

Roland Glück,  <https://orcid.org/0000-0001-7909-1942>

Matthias Beyrle,  <http://orcid.org/0000-0002-3164-1068>

Schrifttum

- [1] K. Drechsler, "Flexible intelligente Bearbeitungstechnologien für komplexe Faserverbundbauteile", Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT, Schlussbericht eines BMBF-Projektes ISBN (Print): 978-3-8396-1088-6, 2015.
- [2] G. Braun, R. Glueck, F. Krebs und M. Schoenheits, "Projekt FlexiCut - Darstellung einer Bearbeitungszelle für die kombinierte Bearbeitung von CFK-Bauteilen", Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016, Braunschweig, 2016.
- [3] H. Domininghaus, P. Elsner, P. Eyerer und T. Hirth, *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*, 7. Auflage. Springer Verlag, 2008.
- [4] T. Stefani, "Process Evaluation of the Automated Production of Thermoplastic Organo Sheets," Hochschule fuer angewandte Wissenschaften Augsburg, Augsburg, Master Thesis, 2016.
- [5] F. Klocke und W. Koenig, *Fertigungsverfahren 3 - Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung*, 4. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
- [6] J. Y. Sheikh-Ahmad, *Machinability of Polymer Composites*. New York: Springer Science + Business Media. LLC, 2009.
- [7] E. Pauksch, *Zerspantechnik*. Braunschweig; Wiesbaden: Friedrich Vieweg und Sohn, 1993.
- [8] J. P. Davim, *Machinability of Fibre-Reinforced Plastics*. De Gruyter, 2015.
- [9] A. Goeke, "Laserstrahltrennen von Faserverbundwerkstoffen," Universitaet Hamburg-Harburg, Hamburg, 2010.
- [10] P. Mucha, "Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK," Dissertation zum Dr.-Ing., Universitaet Stuttgart, Stuttgart, 2015.
- [11] O. Rösch, "Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern," Dissertation zum Dr.-Ing., Universität München, München, 2014.